

⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

⑪ N° de publication :

2 772 512

(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

⑫ N° d'enregistrement national :

97 15931

⑮ Int Cl<sup>6</sup> : H 01 H 37/54, H 01 H 1/00, H 01 L 49/00

⑫

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

⑫ Date de dépôt : 16.12.97.

⑬ Priorité :

⑭ Date de mise à la disposition du public de la  
demande : 18.06.99 Bulletin 99/24.

⑮ Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du  
présent fascicule*

⑯ Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

⑰ Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATO-  
MIQUE Etablissement de caractere scientifique techni-  
que et industriel — FR.

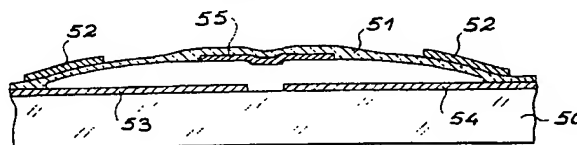
⑱ Inventeur(s) : FOUILLET YVES.

⑲ Titulaire(s) :

⑳ Mandataire(s) : BREVATOME.

① MICROSYSTEME A ELEMENT DEFORMABLE SOUS L'EFFET D'UN ACTIONNEUR THERMIQUE.

② L'invention concerne un microsystème, utilisable no-  
tamment pour réaliser des micro-rupteurs ou des micro-val-  
ves, constitué sur un substrat (50) et servant à obtenir un  
basculement entre un premier état de fonctionnement et un  
deuxième état de fonctionnement grâce à un actionneur  
thermique à effet bilame. L'actionneur comprend un élé-  
ment déformable (51) rattaché, par des extrémités oppo-  
sées, au substrat (50) de façon à présenter naturellement  
une déflexion sans contrainte par rapport à une surface du  
substrat qui lui est opposée, cette déflexion naturelle déter-  
minant le premier état de fonctionnement, le deuxième état  
de fonctionnement étant provoqué par l'actionneur thermi-  
que qui induit, sous l'effet d'une variation de température,  
une déformation de l'élément déformable (51) tendant à di-  
minuer sa déflexion et le soumettant à une contrainte de  
compression qui entraîne son basculement par effet de  
flambage dans une direction opposée à sa déflexion natu-  
relle.



FR 2 772 512 - A1



1

MICROSYSTEME A ELEMENT DEFORMABLE SOUS L'EFFET D'UN  
ACTIONNEUR THERMIQUE

5    Domaine technique

La présente invention concerne un microsysteme à élément déformable sous l'effet d'un actionneur thermique. Parmi les applications de tels  
10 microsystemes on peut citer les micro-rupteurs destinés à ouvrir ou à fermer un circuit électrique et les micro-valves destinées à des applications microfluidiques.

Ces microsystemes comportent un élément, en  
15 forme de poutre ou de membrane, déformable sous l'effet de la chaleur. Un comportement fortement non linéaire est recherché afin d'obtenir un basculement rapide entre deux états, un état ouvert et un état fermé.

Ces microsystemes doivent pouvoir être  
20 conçus pour être éventuellement compatibles avec la réalisation de composants micro-électroniques.

Etat de la technique antérieure

25           On peut classer les micro-actionneurs utilisés pour provoquer la déformation de l'élément déformable du microsysteme selon trois catégories principales en fonction des principes mis en oeuvre. On trouve d'abord les actionneurs thermiques qui utilisent  
30 la dilatation thermique d'un ou de plusieurs éléments constitutifs. On trouve ensuite les actionneurs électrostatiques qui utilisent la force électrostatique générée entre deux éléments de charges différentes. On trouve enfin les actionneurs magnétiques qui utilisent  
35 des forces induites par un champ magnétique.

Il existe cependant aussi des actionneurs utilisant des matériaux piézoélectriques et magnétostrictifs.

Les actionneurs thermiques semblent les plus intéressants car ils permettent généralement de plus grandes déformations que les actionneurs électrostatiques tandis que les actionneurs magnétiques, ou ceux utilisant des matériaux piézoélectriques ou magnétostrictifs, sont généralement difficiles à mettre en oeuvre par les procédés classiques du micro-usinage, notamment pour les réalisations nécessitant la compatibilité technologique avec la micro-électronique. De plus, avec un actionneur thermique, il est facile de généraliser l'utilisation d'un micro-rupteur commandé à un micro-rupteur thermique (changement d'état à partir d'une température critique), ou à un micro-disjoncteur (changement d'état à partir d'une intensité de courant critique).

La manière la plus simple pour réaliser un actionneur thermique est d'utiliser un bilame. Ce dernier est constitué de deux couches de matériaux ayant des coefficients de dilatation thermique différents de manière qu'une variation de température de l'ensemble entraîne une déflexion du bilame. L'élévation de température est obtenue par effet Joule en faisant passer soit directement un courant électrique dans l'une des deux couches constituant le bilame, soit en faisant passer un courant électrique dans des résistances formées sur l'une de ces couches et obtenues, par exemple, par implantation si l'une des couches est en silicium.

La déformation d'un bilame dépend de son type de fixation sur son support. La figure 1 montre la déformation, sous l'effet d'une contrainte thermique d'un bilame libre, c'est-à-dire aux extrémités non

fixées mais simplement supportées, constitué d'une couche 1 et d'une couche 2 présentant des coefficients de dilatation thermique différents. Le trait mixte montre la position moyenne du bilame en l'absence d'une

5 contrainte thermique. La théorie montre que, dans ce cas, le rayon de courbure  $\rho$  est uniforme. Il est négatif si le coefficient de dilatation de la couche 2 est plus grand que celui de la couche 1.

Si la structure déformable est encastrée à

10 ses extrémités, il est préférable, en raison de l'allure de la déformée de localiser le bilame dans les zones où l'effet de dilatation agit dans le sens de la courbure. Suivant la localisation du bilame, une augmentation de température peut défléchir la structure

15 dans un sens ou dans l'autre sens.

La figure 2 montre une première structure bilame de cette sorte. Elle comprend une première couche 3 et une deuxième couche 4 formée de deux portions. Le trait mixte indique la position moyenne du

20 bilame en l'absence d'une contrainte thermique. Le coefficient de dilatation thermique de la couche 4 étant plus grand que celui de la couche 3, la déformation de la structure bilame sous l'effet d'une dilatation se fait dans le sens indiqué sur la figure

25 2.

La figure 3 montre une deuxième structure bilame encastrée à ses extrémités. Elle comprend une première couche 5, qui est effectivement encastrée, et une deuxième couche 6 qui est située sur la partie

30 centrale de la couche 5. Le trait mixte indique la position moyenne du bilame en l'absence d'une contrainte thermique. Le coefficient de dilatation thermique de la couche 6 étant plus grand que celui de la couche 5, la déformation de la structure bilame sous

l'effet d'une dilatation se fait dans le sens indiqué sur la figure 3.

On montre aussi que l'amplitude  $f$  de la déformée est proportionnelle à la température et donc  
5 que la déformée dépend de la température ambiante. Il est possible cependant de trouver des configurations de structure permettant d'obtenir que la déformée reste indépendante de la température ambiante.

Cependant, en raison des mécanismes  
10 complexes mis en jeu lors de l'ouverture et de la fermeture d'un circuit électrique (phénomènes d'arc électrique, de rebond, etc.), il est préférable de rechercher des systèmes pour lesquels le changement d'état (le passage de l'état d'ouverture du circuit à  
15 son état de fermeture) soit le plus rapide possible. L'idéal serait de concevoir des systèmes ayant une température critique au delà de laquelle on change d'état d'équilibre mécanique. Ceci ne peut cependant pas être obtenu simplement par un bilame.

20 Le brevet US-A-5 463 233 divulgue un interrupteur thermique micro-usiné combinant un bilame et un actionneur électrostatique. En l'absence de déformation du bilame, la force électrostatique est faible, le bilame est en équilibre entre la force  
25 électrostatique et la force de rappel mécanique de la structure. Quand la température augmente, l'effet bilame rapproche les électrodes de l'actionneur jusqu'à ce que la force électrostatique devienne suffisamment forte pour vaincre la force de rappel mécanique et  
30 provoquer ainsi le basculement instantané de la structure.

Une autre manière de générer un déplacement par changement de température consiste à chauffer une poutre ou une membrane encastrée. Le figure 4 montre  
35 une membrane 7 encastrée, située en position de repos

selon le trait mixte et en position déformée selon le trait plein. La dilatation thermique a pour effet de mettre la structure en compression. La théorie des poutres ou des membranes montre qu'il existe une

5 contrainte de compression (donc une température) critique au delà de laquelle la structure est en flambage. L'article "Buckled Membranes for Microstructures" de D.S. Popescu et al., paru dans la

10 revue IEEE, pages 188-192 (1994), décrit une telle structure mise en compression. Dans le cas d'une poutre d'épaisseur  $h$ , de longueur  $L$ , réalisée avec un matériau ayant un coefficient de dilatation  $\alpha$ , la contrainte de compression critique est donnée par la relation :

15 
$$\theta_{cr} = \frac{\pi^2 h^2}{3\alpha L^2} \quad (1)$$

La théorie montre aussi que l'amplitude  $f$  de la déformée de la structure est donnée par la relation :

20 
$$f = \pm \sqrt{\frac{\theta}{\theta_{cr}}} - 1 \quad (2)$$

Dans le cas d'une membrane carrée,  $A$  vaut 2,298  $h$ . L'un des inconvénients de cette méthode réside dans l'indétermination du signe de  $f$ . Comme le montre la

25 figure 4, la membrane 7 peut très bien se déformer dans le sens opposé et prendre la position indiquée par la ligne de trait interrompu. On constate aussi d'après la relation (2) qu'il est difficile d'obtenir de grandes amplitudes de déplacement pour des structures réalisées

30 par des technologies de surface, c'est-à-dire en couches minces.

Une autre solution dérivée de la précédente consiste à utiliser une membrane naturellement en

flambage. Ceci est par exemple obtenu en utilisant des membranes en oxyde de silicium. Le système a donc deux positions stables  $f = \pm A \sqrt{\frac{S}{S_{cr}} - 1}$ , ou  $S$  est la

5 contrainte interne et  $S_{cr}$  est la contrainte critique de flambage. Pour basculer d'une position à une autre il est nécessaire d'ajouter une action mécanique supplémentaire. Dans l'article cité plus haut de D.S. Popescu et al., cette action mécanique supplémentaire est constituée par un champ de pression sur la  
10 membrane.

Le bilame encastré a été étudié dans l'article "Analysis of Mi-metal Thermostats" de TIMOSHENKO paru dans la revue Journal of the Optical Society of America, vol. 11, pages 233-255, 1925. Cet  
15 article donne notamment une étude théorique de la structure représentée à la figure 5. La structure déformable est une poutre 10 constituée d'un bilame dont les extrémités sont retenues par deux supports fixes 11 et 12. La rétention des extrémités supprime  
20 les degrés de liberté en translation mais laisse libre le degré de liberté en rotation suivant un axe perpendiculaire au plan de la figure. Au repos, c'est-à-dire à une température telle qu'il n'y a pas de contrainte thermique dues à l'effet bilame, la poutre,  
25 représentée en traits pleins sur la figure 5, présente une déformée initiale en arc de cercle de rayon  $\rho_0$ . Lorsque la température augmente, les effets suivants se produisent :

- 1er effet : la dilatation thermique  
30 longitudinale de la poutre étant bloquée par les supports 11 et 12, la poutre est soumise à une contrainte de compression.

- 2ème effet : le bilame est réalisé de manière qu'une augmentation de la température entraîne

une augmentation de la courbure. Ceci se traduit par une déflexion de la poutre vers le bas sur la figure 5,

- 3ème effet : en raison de l'effet précédent, la longueur de la poutre diminue. Ceci induit une contrainte interne supplémentaire de compression dans la poutre.

Les premier et troisième effets favorisent le flambage de la structure, ce qui provoque le basculement de la poutre à partir d'une température critique. La poutre prend alors la position indiquée en traits interrompus sur la figure 5.

Les systèmes de l'art antérieur étudiés ci-dessus présentent des caractéristiques telles qu'ils ne permettent pas d'obtenir un micro-actionneur pour défléchir une membrane ou une poutre en utilisant les effets de dilatation thermique avec les avantages suivants :

- une non-linéarité entre température et déflexion de manière à avoir un changement brutal (basculement et notion de température critique) avec une amplitude importante ;

- pas d'autre actionneur que celui procurant l'effet de dilatation thermique ;

- l'utilisation d'une technique de réalisation en couche mince, ce qui oblige à avoir des encastrements rigides pour l'élément déformable.

#### Exposé de l'invention

Pour remédier aux inconvénients cités ci-dessus, on propose un microsystème dont l'élément déformable (poutre ou membrane) est, au repos, naturellement défléchi, cette déflexion initiale n'étant pas du type flambage. L'élément déformable présente donc une forme non plane, prédéfinie par



construction. Cet élément déformable est encastré et la déformation provoquée par un actionneur thermique résulte d'un effet bilame et d'un phénomène de flambage induit par la dilatation thermique. A l'état de repos,  
5 l'encastrement n'exerce pas de contrainte sur l'élément déformable.

L'invention a donc pour objet un microsystème constitué sur un substrat et servant à obtenir un basculement entre un premier état de  
10 fonctionnement et un deuxième état de fonctionnement grâce à un actionneur thermique à effet bilame, ledit actionneur comprenant un élément déformable rattaché, par des extrémités opposées, au substrat de façon à présenter naturellement une déflexion sans contrainte  
15 par rapport à une surface du substrat qui lui est opposée, cette déflexion naturelle déterminant ledit premier état de fonctionnement, ledit deuxième état de fonctionnement étant provoqué par ledit actionneur thermique qui induit, sous l'effet d'une variation de  
20 température, une déformation de l'élément déformable tendant à diminuer sa déflexion et le soumettant à une contrainte de compression qui entraîne son basculement par effet de flambage dans une direction opposée à sa déflexion naturelle. Lorsque la commande thermique  
25 provoquée par l'actionneur est supprimée, le microsystème revient à son premier état de fonctionnement.

Le premier état de fonctionnement peut correspondre à une position de l'élément déformable la  
30 plus éloignée de ladite surface du substrat, ledit deuxième état de fonctionnement correspondant à une position de l'élément déformable la plus proche de ladite surface du substrat. La situation inverse est également possible.

La partie centrale de l'élément déformable peut être plus épaisse que sa partie périphérique.

L'invention a aussi pour objet un micro-rupteur constitué d'un microsystème tel que défini ci-dessus, un système d'électrodes étant prévu dans le microsystème, sur la surface du substrat et sur l'élément déformable, de façon à présenter une continuité électrique entre électrodes dans l'un desdits états de fonctionnement et une absence de continuité électrique dans l'autre desdits états de fonctionnement.

L'invention a aussi pour objet une micro-valve constituée d'un microsystème tel que défini ci-dessus, un orifice de communication de fluide étant prévu dans le microsystème de façon à être obturé dans l'un desdits états de fonctionnement et ouvert dans l'autre desdits états de fonctionnement.

L'invention a aussi pour objet un procédé de fabrication d'un microsystème tel que défini ci-dessus, caractérisé en ce que :

- l'élément déformable est obtenu par dépôt d'une couche de matériau approprié sur ladite surface du substrat, la couche étant solidaire de ladite surface à l'exception d'une partie formant voûte au-dessus de ladite surface et constituant l'élément déformable,

- des moyens, obtenus par dépôt, sont prévus pour être en contact intime avec ledit élément déformable et constituer avec celui-ci ledit actionneur thermique à effet bilame.

Avantageusement, la partie formant voûte est obtenue grâce au dépôt préalable, sur ladite surface du substrat, d'une masse sacrificielle destinée à donner une forme définie audit élément déformable une fois que la masse sacrificielle aura été sacrifiée, la

masse sacrificielle étant prévue pour que, à l'issue du procédé, ledit élément déformable présente naturellement une déflexion sans contrainte par rapport à ladite surface du substrat.

5 Selon une première variante, le procédé comprend les étapes successives suivantes :

- dépôt sur ladite surface du substrat d'une couche de matériau sacrificiel,
- obtention sur la couche de matériau sacrificiel, d'une masse d'un matériau susceptible de fluer sans altérer le substrat et le matériau sacrificiel,
- fluage du matériau susceptible de fluer pour lui conférer une forme complémentaire de la forme en voûte désirée pour l'élément déformable,
- gravure de la couche de matériau sacrificiel et du matériau qui a flué jusqu'à ne garder sur ladite surface du substrat que ladite masse sacrificielle qui reproduit la forme que possédait le matériau qui a flué,
- dépôt de la couche destinée à fournir l'élément déformable,
- dépôt des moyens destinés à constituer, avec ledit élément déformable, ledit actionneur thermique,

25 - élimination de la masse sacrificielle.

Dans ce cas, la masse de matériau susceptible de fluer peut être obtenue par dépôt d'une couche de résine photosensible sur la couche de matériau sacrificiel et par gravure de cette couche de résine photosensible pour n'en garder que ladite masse de matériau susceptible de fluer.

30 Selon une deuxième variante, le procédé comprend les étapes successives suivantes :

- obtention sur ladite surface du substrat d'une masse sacrificielle, à profil en escalier, et de forme sensiblement complémentaire de la forme en voûte désirée pour l'élément déformable,

5                   - dépôt de la couche destinée à fournir l'élément déformable,

                  - dépôt des moyens destinés à constituer, avec ledit élément déformable, ledit actionneur thermique,

10                   - élimination de la masse sacrificielle.

Dans ce cas, la masse sacrificielle peut être obtenue par dépôt sur ladite surface du substrat d'une couche de matériau sacrificiel et gravures successives de cette couche de matériau sacrificiel jusqu'à atteindre la surface du substrat à l'exception  
15 de l'emplacement de l'élément déformable où les gravures laissent subsister ladite masse sacrificielle.

Selon une troisième variante, le procédé comprend les étapes successives suivantes :

20                   - obtention sur ladite surface du substrat d'une masse de matériau sacrificiel d'épaisseur uniforme à l'emplacement de l'élément déformable,

                  - dépôt de la couche destinée à fournir l'élément déformable, le dépôt étant réalisé de façon  
25 que la partie de cette couche recouvrant la masse de matériau sacrificiel soit naturellement contrainte,

                  - dépôt, sur la couche précédemment déposée, d'une couche dans laquelle seront formés les moyens destinés à constituer, avec ledit élément  
30 déformable, ledit actionneur thermique, ce dépôt étant réalisé à une température déterminée pour que, à l'issue du procédé, l'élément déformable soit naturellement défléchi,

- gravure de la couche précédemment déposée pour former les moyens destinés à constituer, avec ledit élément déformable, ledit actionneur thermique,

- élimination de la masse sacrificielle.

5 Dans ce cas, la masse sacrificielle peut être obtenue par dépôt sur ladite surface du substrat d'une couche de matériau sacrificiel et gravure de cette couche de matériau sacrificiel.

10 Quel que soit le procédé mis en oeuvre, il peut être nécessaire de prévoir une étape consistant à ouvrir l'élément déformable de façon que cette ouverture de l'élément déformable permette d'éliminer la masse sacrificielle.

#### 15 Brève description des dessins

L'invention sera mieux comprise au moyen de la description qui va suivre, donnée à titre d'exemple non limitatif, accompagnée des dessins annexés parmi  
20 lesquels :

- les figures 1 à 5, déjà décrites, représentent des dispositifs à élément déformable sous l'effet d'un actionneur thermique,

25 - les figures 6A à 6H sont illustratives d'une première variante d'un procédé de fabrication d'un microsystème à élément déformable sous l'effet d'un actionneur thermique selon la présente invention,

30 - les figures 7A à 7D sont illustratives d'une deuxième variante d'un procédé de fabrication d'un microsystème à élément déformable sous l'effet d'un actionneur thermique selon la présente invention,

35 - les figures 8A à 8D sont illustratives d'une troisième variante d'un procédé de fabrication d'un microsystème à élément déformable sous l'effet d'un actionneur thermique selon la présente invention,

- la figure 9 représente, vu en coupe, un micro-rupteur selon la présente invention à l'état ouvert,

5 - la figure 10 représente, vu en coupe, un autre micro-rupteur selon la présente invention à l'état fermé,

- la figure 11 représente, vu en coupe, encore un autre micro-rupteur selon la présente invention à l'état ouvert,

10 - la figure 12 représente, vue en coupe, une micro-valve selon la présente invention à l'état ouvert.

#### 15 Description détaillée de modes de réalisation de l'invention

Généralement, les structures obtenues par des procédés de la microtechnologie ont une géométrie plane, aussi la réalisation de poutres ou de membranes  
20 naturellement défléchies nécessite une attention particulière.

Les procédés qui vont maintenant être décrits mettent en oeuvre le dépôt de l'élément déformable sur une couche, dite couche sacrificielle,  
25 que l'on élimine en fin de procédé. On peut ainsi avoir un élément déformable, poutre ou membrane, en  $\text{Si}_3\text{N}_4$  en utilisant une couche sacrificielle en tungstène.

Une première variante du procédé selon l'invention, illustrée par les figures 6A à 6H, permet  
30 d'obtenir un microsystème à élément déformable (poutre ou membrane) non plan et non contraint. Sur un substrat 20, par exemple en verre, on dépose d'abord une couche sacrificielle 21, par exemple en tungstène, puis une couche de résine photosensible 22 (figure 6A). La  
35 couche de résine est gravée pour ne laisser qu'une

masse de résine 23 dont la superficie est déterminée par l'élément déformable désiré (figure 6B). Par un traitement thermique, on provoque le fluage de la résine photosensible. On obtient une masse 24 dont la  
5 forme est complémentaire de la forme en voûte désirée pour l'élément déformable (figure 6C).

La couche sacrificielle 21 est ensuite gravée. La figure 6D montre une première étape de gravure où la couche sacrificielle 21 est gravée sur  
10 une partie de son épaisseur aux endroits où cette couche n'est pas masquée par la masse 24 de résine. La figure 6E montre une deuxième étape de gravure où la masse 24 de résine a été éliminée, par exemple par gravure ionique réactive. La couche sacrificielle a  
15 simultanément été gravée en reproduisant la forme de la masse 24 de la figure 6D. On obtient une masse 25 de matériau sacrificiel.

On pourrait obtenir directement la masse sacrificielle telle que montrée sur la figure 6E en  
20 utilisant un matériau organique (par exemple un polyimide) à condition que ce matériau puisse fluier tout en supportant sans dégradation les étapes de fabrication de l'élément déformable.

On recouvre ensuite la surface du substrat  
25 20 supportant la masse sacrificielle 25 d'abord d'une couche 26, par exemple en  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ou en silicium, puis d'une couche 27 en matériau conducteur tel que l'aluminium, l'or, le nickel (voir la figure 6F). Les matériaux des couches 25 et 26 doivent avoir des  
30 coefficients de dilatation thermique différents tout en restant compatible avec l'étape postérieure de libération de l'élément déformable.

La couche 27 est ensuite gravée (voir la figure 6G) pour y délimiter des parties 28 de  
35 l'actionneur thermique.

La couche 26 est également gravée. Cette gravure est déterminée en fonction de la forme que l'on désire donner à l'élément déformable (poutre ou membrane). Elle permet également d'ouvrir l'élément déformable afin de permettre l'élimination de la masse sacrificielle 25.

On obtient alors le microsystème illustré par la figure 6H possédant un élément déformable 29 naturellement défléchi par rapport à la surface du substrat 20.

Une deuxième variante du procédé selon l'invention, illustrée par les figures 7A à 7D, permet également d'obtenir un microsystème à élément déformable non plan et non contraint. Sur une surface d'un substrat 30, on dépose une couche sacrificielle 31 (voir la figure 7A). Cette couche sacrificielle est gravée à plusieurs reprises et avec autant de masques jusqu'à obtenir une masse sacrificielle 32, à profil en escalier, et de forme sensiblement complémentaire de la forme en voûte désirée pour l'élément déformable. Autour de la masse sacrificielle 32, la surface du substrat est apparente (voir la figure 7B). On dépose ensuite, comme précédemment, une couche 33 et une couche 34 destinées à constituer l'élément déformable et l'actionneur thermique.

Comme précédemment, la couche 34 est gravée pour obtenir des parties 35. De même, la couche 33 est gravée en fonction de la forme que l'on désire donner à l'élément déformable et pour ouvrir cet élément déformable afin de permettre l'élimination de la masse sacrificielle 32.

On obtient le microsystème illustré par la figure 7D possédant un élément déformable 36 naturellement défléchi par rapport à la surface du



substrat 30. Les matériaux utilisés peuvent être les mêmes que précédemment.

Une troisième variante du procédé selon l'invention, illustrée par les figures 8A à 8D, permet  
5 d'obtenir un microsystème à élément déformable plan et précontraint où l'on jouera sur une différence de température lors de la mise en forme des deux parties constituant le bilame.

Sur une surface d'un substrat 40, on dépose  
10 une couche sacrificielle que l'on grave pour obtenir une masse 41 d'épaisseur uniforme à l'emplacement du futur élément déformable (voir la figure 8A). On dépose ensuite une couche 42, par exemple en  $\text{SiO}_2$  ou en  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , qui recouvre la masse sacrificielle 41 et la surface  
15 apparente du substrat. On obtient ainsi une partie 43 de la couche 42, qui est rectiligne au-dessus de la masse sacrificielle 41 et naturellement contrainte (voir la figure 8B). On dépose ensuite une seconde couche 44 destinée à compléter le bilame. Cette couche  
20 44 est déposée à une température supérieure à la température ambiante, ce qui conduira, à l'issue du procédé, à une déflexion naturelle de l'élément déformable.

Comme précédemment, la couche 44 est gravée  
25 pour obtenir des parties 45 (voir la figure 8C). De même, la couche 42 est gravée en fonction de la forme que l'on désire donner à l'élément déformable et pour ouvrir cet élément déformable afin de permettre l'élimination de la masse sacrificielle 41.

On obtient le microsystème illustré par la  
30 figure 8D où l'élément déformable 43 est naturellement défléchi par rapport à la surface du substrat 40. La valeur de la précontrainte dans la couche 42 doit être ajustée pour obtenir le flambage uniquement lorsque la  
35 structure bilame est activée.

A titre d'exemple, l'élément déformable peut être constitué d'une poutre de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  de 1  $\mu\text{m}$  d'épaisseur et de 200  $\mu\text{m}$  de longueur. La déflexion initiale (à la température ambiante) de la poutre peut être de 2  $\mu\text{m}$ . Le reste de la structure bilame peut être en aluminium et avoir 1  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. La structure bascule pour une variation de température comprise entre 100 et 120°C. L'amplitude obtenue est de l'ordre de 5  $\mu\text{m}$  alors que pour une variation de température allant de 0 à 100°C la déflexion est inférieure à 1  $\mu\text{m}$ .

Les figures suivantes illustrent des exemples d'application de l'invention et qui peuvent être obtenus par les procédés décrits ci-dessus.

La figure 9 représente un micro-rupteur formé sur un substrat 50. Le bilame est constitué d'un élément déformable 51, par exemple en forme de poutre, et de deux parties 52. Au cours du procédé de fabrication du microsystème, des électrodes 53, 54 et 55 ont été prévues. Les électrodes 53 et 54 ont été réalisées avant le dépôt de la masse sacrificielle. L'électrode 55 est réalisée sur la masse sacrificielle, avant le dépôt des couches du bilame.

Il est aussi possible de concevoir un micro-rupteur normalement fermé comme le montre la figure 10. Le micro-rupteur a été formé sur un substrat 60. Le bilame est constitué d'un élément déformable 61 (poutre ou membrane) et d'une partie 62. Les électrodes 63 et 64 ont été réalisées avant le dépôt de la masse sacrificielle. L'électrode 65 est réalisée sur la masse sacrificielle, avant le dépôt des couches du bilame. L'état normalement fermé pour le micro-rupteur est obtenu en utilisant la troisième variante du procédé selon l'invention et en centrant la partie 62 sur l'élément déformable 61.

On comprend que lorsque le bilame des figures 9 et 10 bascule, il y a passage d'un état de fonctionnement donné vers un autre état de fonctionnement. Ainsi, pour la figure 9, le basculement du bilame permettra le passage de l'état ouvert (cas représenté à la figure 9) à l'état fermé par mise en contact de l'électrode 55 avec les électrodes 53 et 54. Le microsysteme de la figure 10 fonctionne de façon inverse.

Afin d'avoir un bon contact électrique entre les électrodes lorsque le micro-rupteur est fermé, il est avantageux d'apporter les modifications représentées sur la figure 11. Cette figure représente un micro-rupteur normalement ouvert, formé sur un substrat 70 supportant des électrodes 74 et 75. L'élément déformable 71 est formé par une couche épaisse, localement amincie afin de rigidifier la partie centrale 72, qui est donc plus épaisse, au niveau de l'électrode 73 supportée par cette partie centrale. Ceci permet aussi de limiter l'influence de dilatation thermique induite par l'électrode 73.

Suivant les épaisseurs de dépôt des différentes couches, et suivant le procédé utilisé, il peut aussi être avantageux de localiser les zones de contact entre l'électrode 73 et les électrodes 74 et 75. Ceci peut être obtenu par une étape de planarisation de la couche sacrificielle ou, comme représenté sur la figure 11, en réalisant des dépôts 76 obtenus par photolithogravure de la couche sacrificielle.

Une autre amélioration possible consiste à utiliser différents matériaux pour réaliser l'autre partie du bilame, référencée 80 sur la figure 11. Les parties 80 peuvent comprendre une première couche 81 adjacente à l'élément déformable et de résistivité

élevée (par exemple en TiN), servant d'élément chauffant. Une deuxième couche 82, superposée à la couche 81, ayant un coefficient de dilatation élevée, a un rôle thermomécanique. La couche 82 peut être en aluminium. Suivant les matériaux utilisés, il peut être nécessaire d'isoler les couches 81 et 82 par une fine couche de passivation 83.

La figure 12 représente, vue en coupe, une micro-valve constituée sur un substrat 90 percé d'un trou 91 faisant communiquer deux faces opposées du substrat. La micro-valve comporte une structure bilame comprenant un élément déformable 92 et une ou des parties 93. En fonction de la température induite dans le bilame, l'élément déformable ferme ou ouvre le trou 91.

## REVENDICATIONS

1. Microsystème constitué sur un substrat (50,60,70,90) et servant à obtenir un basculement entre un premier état de fonctionnement et un deuxième état de fonctionnement grâce à un actionneur thermique à effet bilame, ledit actionneur comprenant un élément déformable (51,61,71,92) rattaché, par des extrémités opposées, au substrat de façon à présenter naturellement une déflexion sans contrainte par rapport à une surface du substrat qui lui est opposée, cette déflexion naturelle déterminant ledit premier état de fonctionnement, ledit deuxième état de fonctionnement étant provoqué par ledit actionneur thermique qui induit, sous l'effet d'une variation de température, une déformation de l'élément déformable (51,61,71,92) tendant à diminuer sa déflexion et le soumettant à une contrainte de compression qui entraîne son basculement par effet de flambage dans une direction opposée à sa déflexion naturelle.

2. Microsystème selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit premier état de fonctionnement correspond à une position de l'élément déformable (51) la plus éloignée de ladite surface du substrat (50), ledit deuxième état de fonctionnement correspondant à une position de l'élément déformable (51) la plus proche de ladite surface du substrat.

3. Microsystème selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit premier état de fonctionnement correspond à une position de l'élément déformable (61) la plus proche de ladite surface du substrat (60), ledit deuxième état de fonctionnement correspondant à une position de l'élément déformable (61) la plus éloignée de ladite surface du substrat (60).

4. Microsystème selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que l'élément déformable (71) présente une partie centrale (72) plus épaisse que sa partie périphérique.

5 5. Microsystème selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que le substrat (50,60,70,90) est en un matériau choisi parmi le verre et le silicium.

10 6. Microsystème selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que l'élément déformable (51,61,71,92) est en un matériau choisi parmi  $\text{Si}_3\text{N}_4$  et  $\text{SiO}_2$ .

15 7. Microsystème selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que l'actionneur thermique à effet bilame est constitué d'une couche en un matériau choisi parmi  $\text{Si}_3\text{N}_4$  et  $\text{SiO}_2$  associée à une couche d'aluminium.

20 8. Micro-rupteur constitué d'un microsystème selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, un système d'électrodes (53,54,55) étant prévu dans le microsystème, sur la surface du substrat (50) et sur l'élément déformable (51), de façon à présenter une continuité électrique entre électrodes (53,54,55) dans l'un desdits états de fonctionnement et une  
25 absence de continuité électrique dans l'autre desdits états de fonctionnement.

9. Micro-rupteur selon la revendication 8, caractérisé en ce que des zones de contact localisées (76) sont prévues sur le système d'électrodes.

30 10. Micro-valve constituée d'un microsystème selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, au moins un orifice de communication de fluide (91) étant prévu dans le microsystème de façon à être obturé dans l'un desdits états de fonctionnement et  
35 ouvert dans l'autre desdits états de fonctionnement.

11. Procédé de fabrication d'un microsystème tel que défini dans la revendication 1, caractérisé en ce que :

5 - l'élément déformable (29,36,43) est obtenu par dépôt d'une couche (26,33,42) de matériau approprié sur ladite surface du substrat (20,30,40), la couche étant solidaire de ladite surface à l'exception d'une partie formant voûte au-dessus de ladite surface et constituant l'élément déformable,

10 - des moyens (28,35,45), obtenus par dépôt, sont prévus pour être en contact intime avec ledit élément déformable (29,36,43) et constituer avec celui-ci ledit actionneur thermique à effet bilame.

12. Procédé selon la revendication 11, 15 caractérisé en ce que la partie formant voûte est obtenue grâce au dépôt préalable, sur ladite surface du substrat (20,30,40), d'une masse sacrificielle (25,32,41) destinée à donner une forme définie audit élément déformable une fois que la masse sacrificielle 20 aura été sacrifiée, la masse sacrificielle (25,32,41) étant prévue pour que, à l'issue du procédé, ledit élément déformable (29,36,43) présente naturellement une déflexion sans contrainte par rapport à ladite surface du substrat (20,30,40).

25 13. Procédé selon la revendication 12, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes successives suivantes :

- dépôt sur ladite surface du substrat (20) d'une couche de matériau sacrificiel (21),

30 - obtention sur la couche de matériau sacrificiel (21), d'une masse (23) d'un matériau susceptible de fluer sans altérer le substrat (20) et le matériau sacrificiel (21),

- fluage du matériau susceptible de fluer pour lui conférer une forme (24) complémentaire de la forme en voûte désirée pour l'élément déformable,

5 - gravure de la couche de matériau sacrificiel (21) et du matériau qui a flué jusqu'à ne garder sur ladite surface du substrat que ladite masse sacrificielle (25) qui reproduit la forme que possédait le matériau qui a flué,

10 - dépôt de la couche (26) destinée à fournir l'élément déformable (29),

- dépôt des moyens (28) destinés à constituer, avec ledit élément déformable (29), ledit actionneur thermique,

15 - élimination de la masse sacrificielle (25).

14. Procédé selon la revendication 13, caractérisé en ce que la masse (23) de matériau susceptible de fluer est obtenue par dépôt d'une couche de résine photosensible (22) sur la couche de matériau  
20 sacrificiel (21) et par gravure de cette couche de résine photosensible pour n'en garder que ladite masse (23) de matériau susceptible de fluer.

15. Procédé selon la revendication 12, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes successives  
25 suivantes :

- obtention sur ladite surface du substrat (30) d'une masse sacrificielle (32), à profil en escalier, et de forme sensiblement complémentaire de la forme en voûte désirée pour l'élément déformable,

30 - dépôt de la couche (33) destinée à fournir l'élément déformable (36),

- dépôt des moyens (35) destinés à constituer, avec ledit élément déformable (36), ledit actionneur thermique,



- élimination de la masse sacrificielle  
(32).

16. Procédé selon la revendication 12,  
caractérisé en ce qu'il comprend les étapes successives  
5 suivantes :

- obtention sur ladite surface du substrat  
(40) d'une masse (41) de matériau sacrificiel  
d'épaisseur uniforme à l'emplacement de l'élément  
déformable (43),

10 - dépôt de la couche (42) destinée à  
fournir l'élément déformable, le dépôt étant réalisé de  
façon que la partie de cette couche recouvrant la masse  
(41) de matériau sacrificiel soit naturellement  
contrainte,

15 - dépôt, sur la couche précédemment  
déposée, d'une couche (44) dans laquelle seront formés  
les moyens (45) destinés à constituer, avec ledit  
élément déformable (43), ledit actionneur thermique, ce  
dépôt étant réalisé à une température déterminée pour  
20 que, à l'issue du procédé, l'élément déformable (43)  
soit naturellement défléchi,

- gravure de la couche précédemment déposée  
pour former les moyens (45) destinés à constituer, avec  
ledit élément déformable, ledit actionneur thermique,

25 - élimination de la masse sacrificielle  
(41).

17. Procédé selon l'une quelconque des  
revendications 13 à 16, caractérisé en ce qu'il est  
prévu une étape consistant à ouvrir l'élément  
30 déformable (29,36,43) de façon que cette ouverture de  
l'élément déformable permette d'éliminer la masse  
sacrificielle (25,32,41).

1 / 6

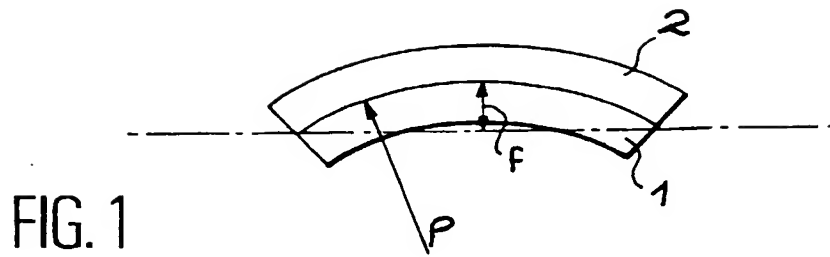


FIG. 1

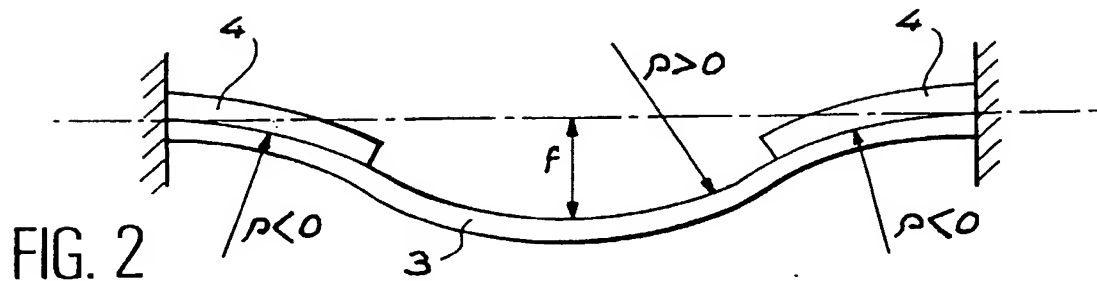


FIG. 2

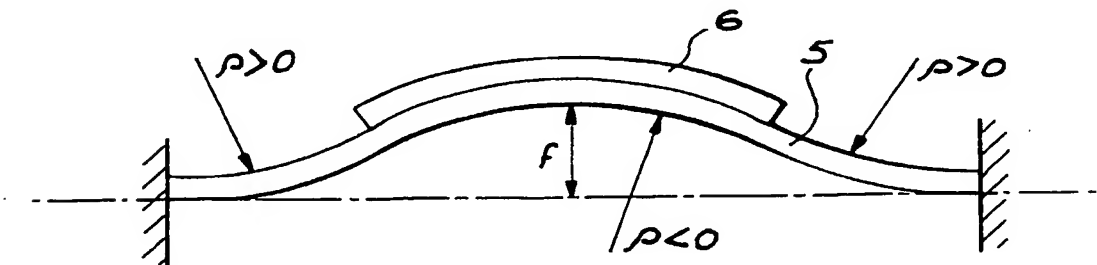


FIG. 3

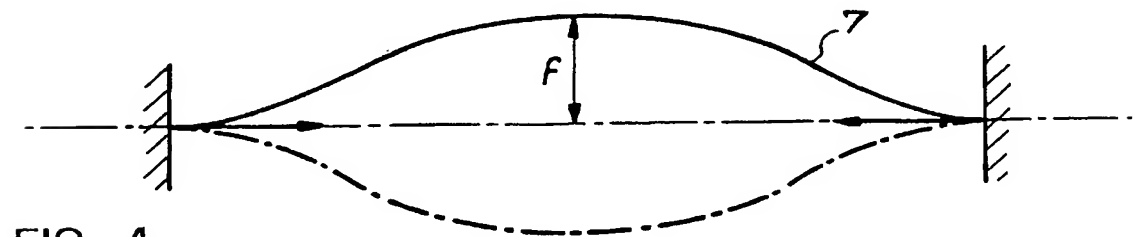


FIG. 4

2 / 6

FIG. 5

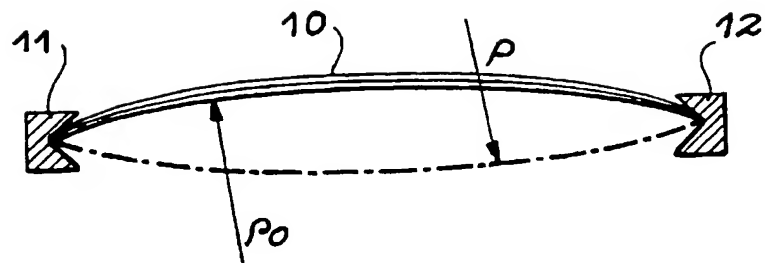
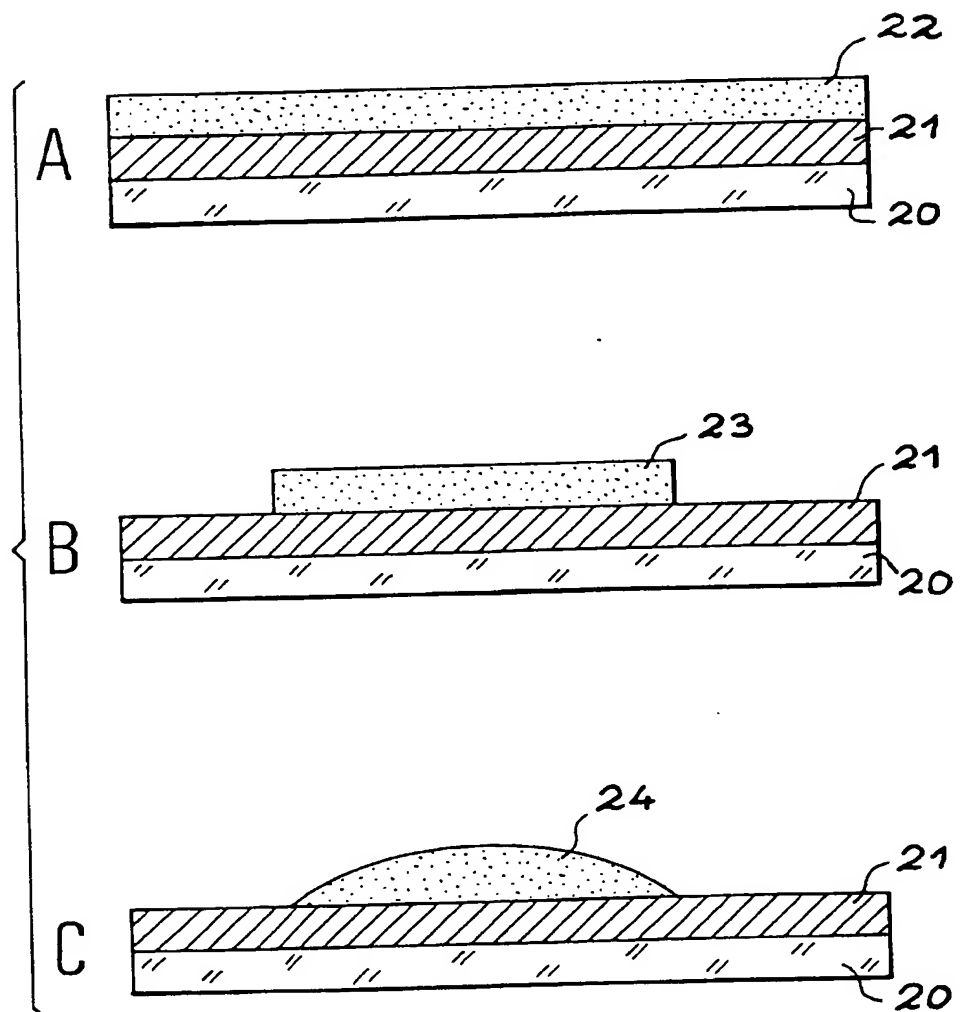
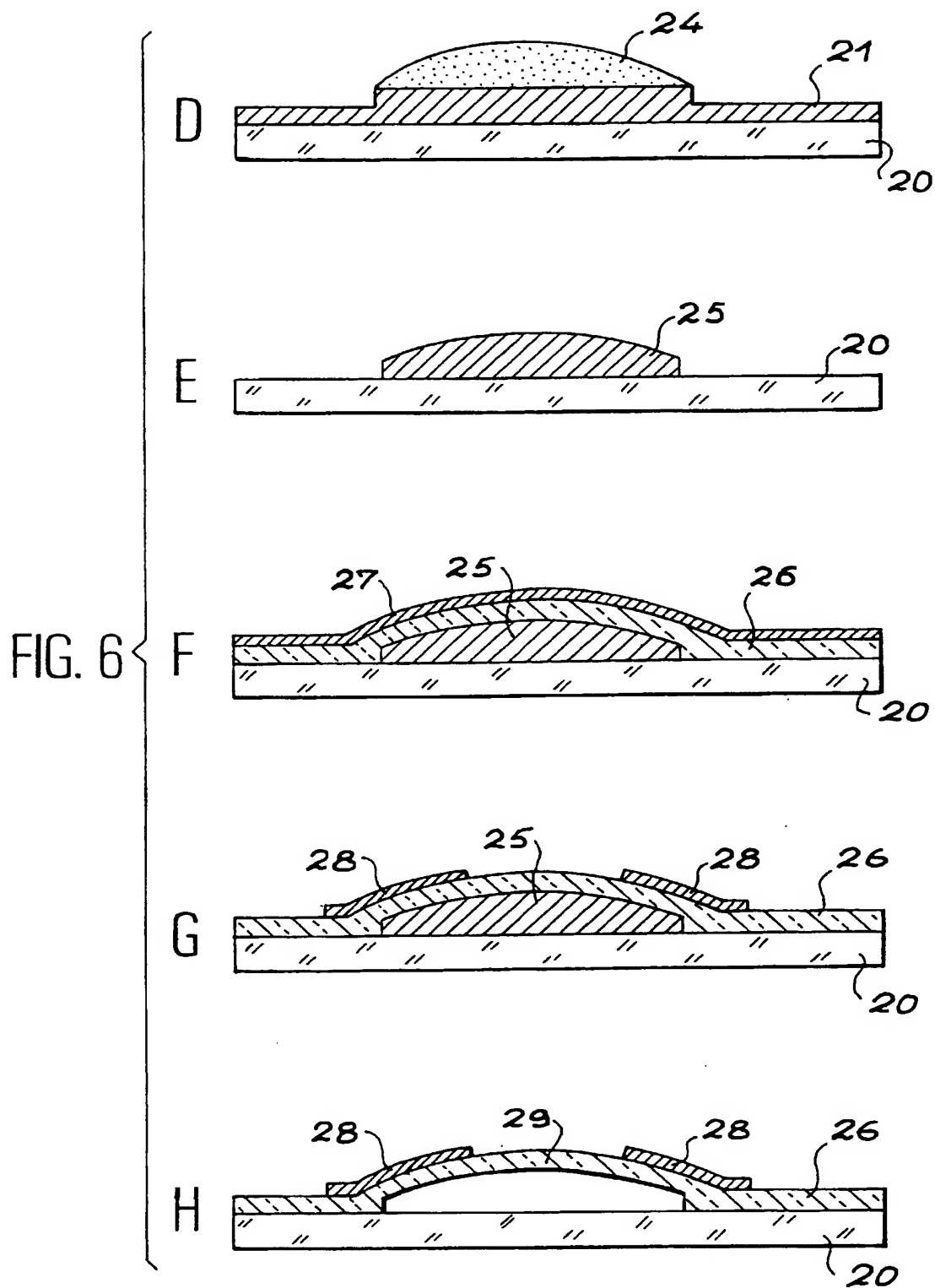


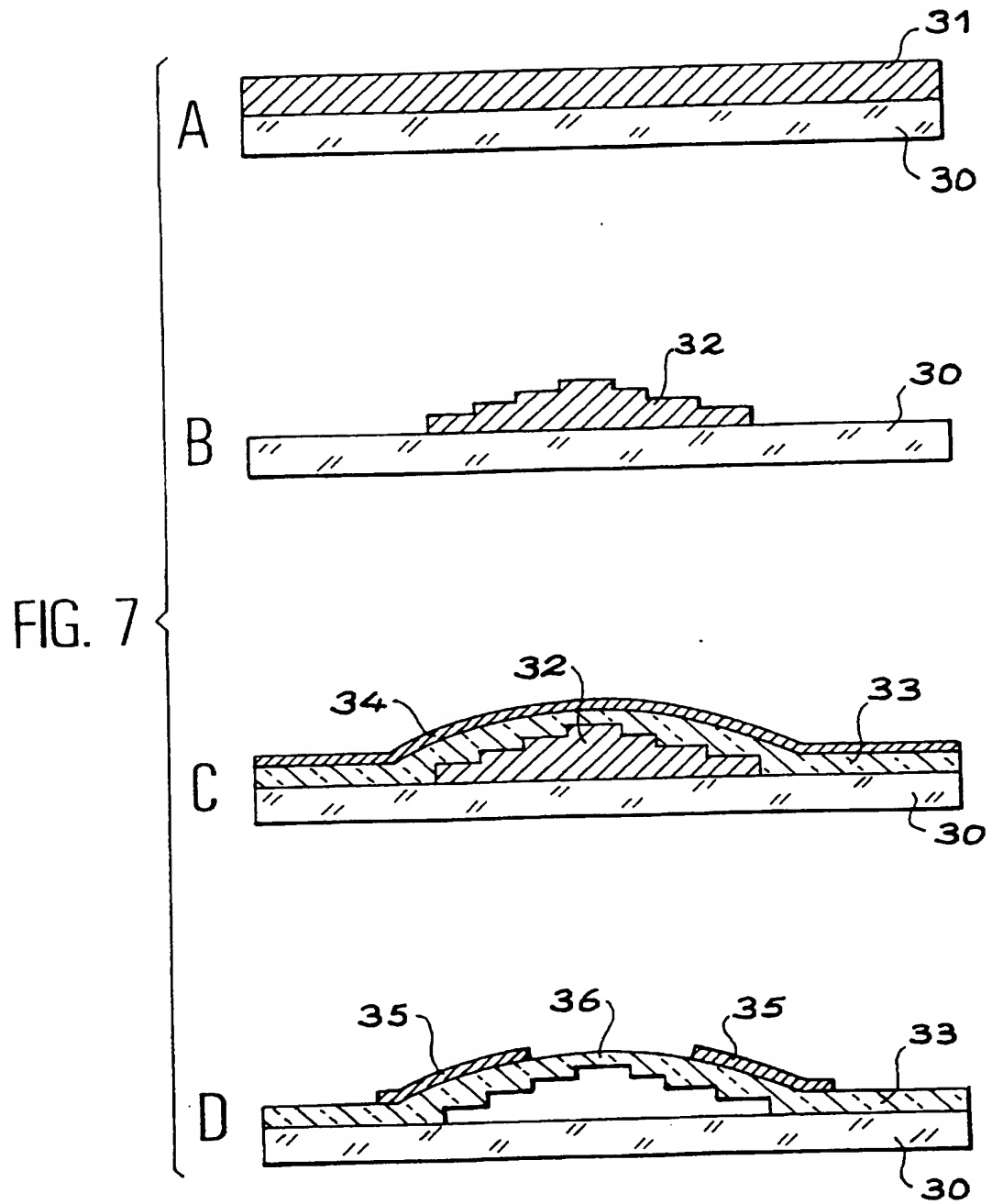
FIG. 6



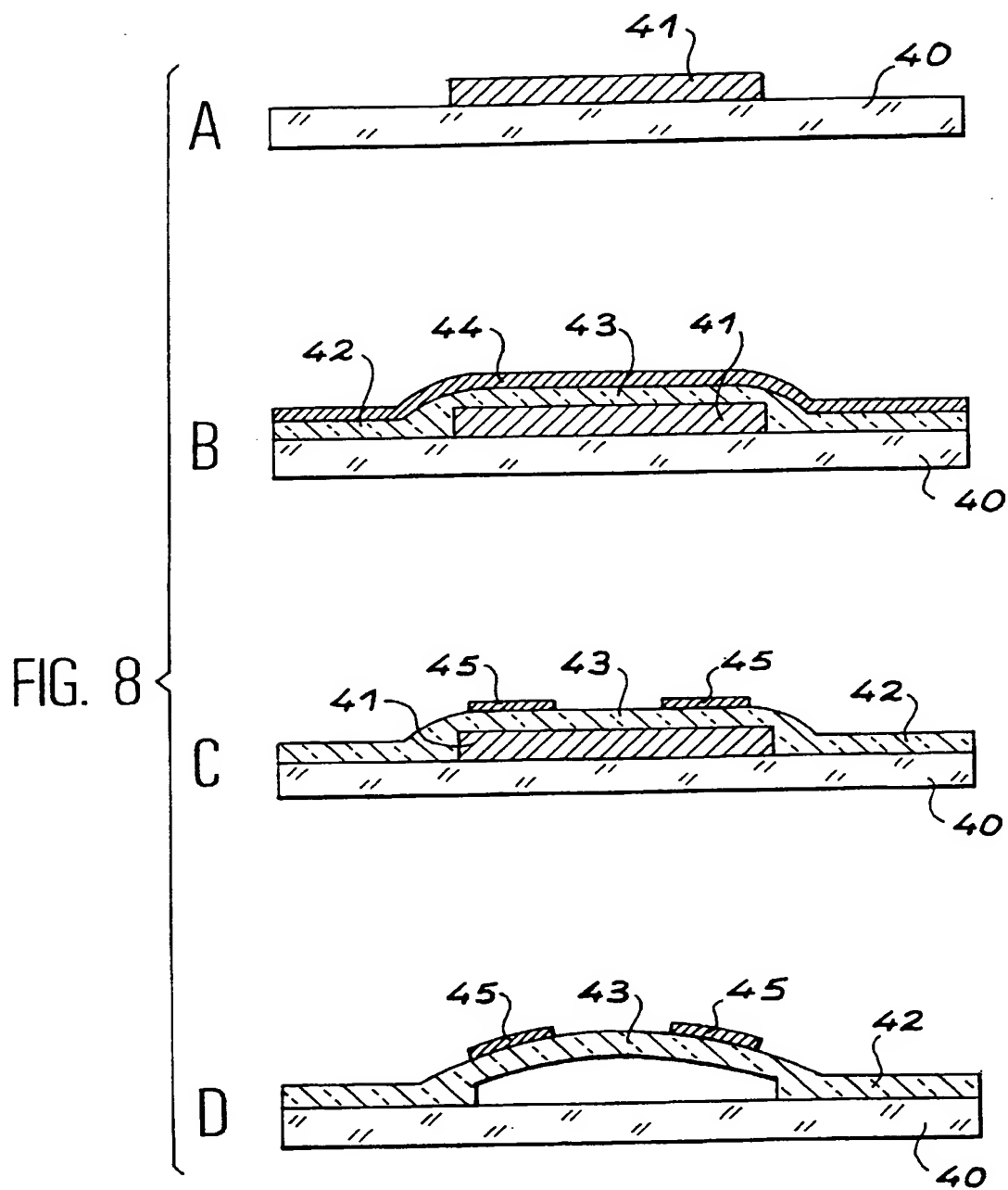
3 / 6



416



5 / 6



6 / 6

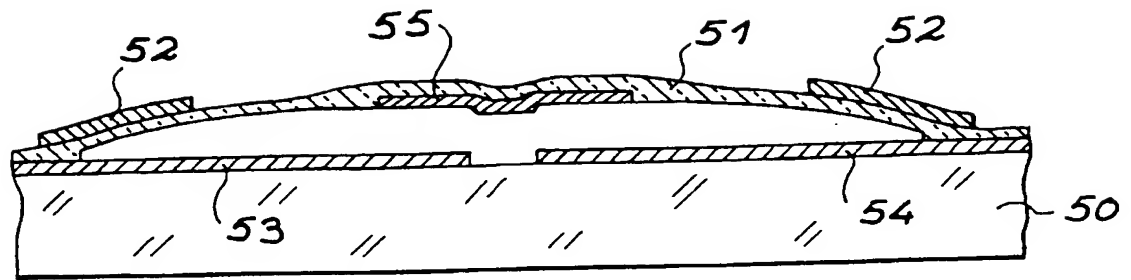


FIG. 9

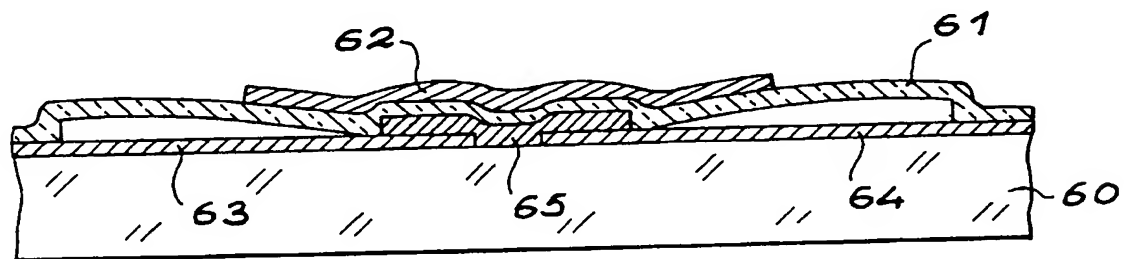


FIG. 10

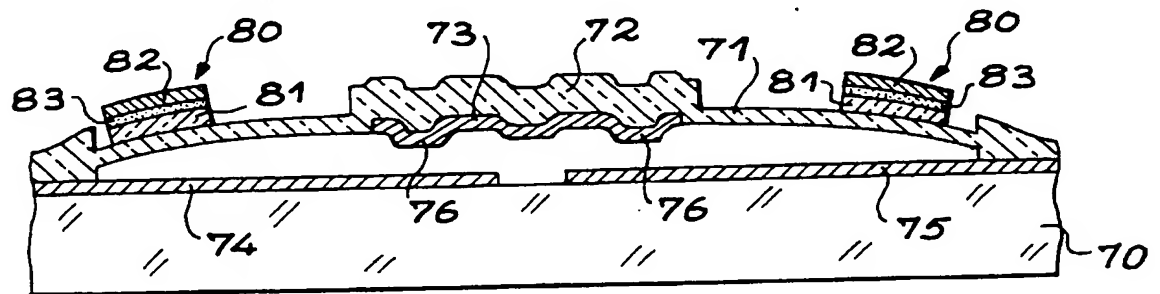


FIG. 11

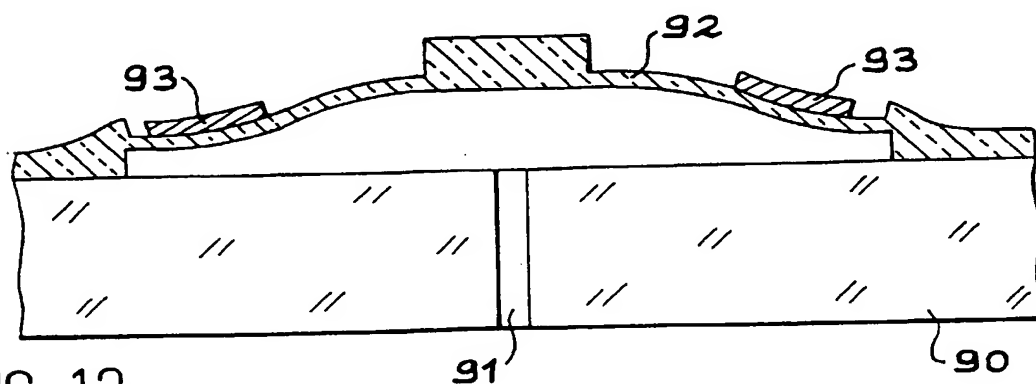


FIG. 12

INSTITUT NATIONAL  
de la  
PROPRIETE INDUSTRIELLE

RAPPORT DE RECHERCHE  
PRELIMINAIRE  
établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement  
national

FA 555241  
FR 9715931

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		Revendications concernées de la demande examinée
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	
X	US 5 681 024 A (LISEC THOMAS ET AL) 28 octobre 1997 * colonne 2, ligne 34-49; figure 1 *	1,3,5-7, 10
X	HIROTSUGU MATOBA ET AL: "A BISTABLE SNAPPING MICROACTUATOR" PROCEEDING OF THE WORKSHOP ON MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS (MEM, OISO, JAN. 25 - 28, 1994, no. WORKSHOP 7, 25 janvier 1994, pages 45-50, XP000528391 INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS	1,2,5,6, 8,9
A	* le document en entier *	11-17
X	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 095, no. 003, 28 avril 1995 & JP 06 338244 A (SHARP CORP), 6 décembre 1994 * abrégé *	1,2,8,9
X	MEHREGANY M: "MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS" IEEE CIRCUITS AND DEVICES MAGAZINE, vol. 9, no. 4, 1 juillet 1993, pages 14-22, XP000441757 * le document en entier *	1,2,4, 10-17
X	EP 0 709 911 A (TEXAS INSTRUMENTS INC) 1 mai 1996 * colonne 15, ligne 4-17 *	1,2,7-9
A		11-17
X	DE 195 16 997 A (SHARP KK) 16 novembre 1995 * le document en entier *	1,3, 10-17
Date d'achèvement de la recherche		Examineur
11 août 1998		Overdijk, J
<p>CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : pertinent à l'encontre d'au moins une revendication ou arrière-plan technologique général O : divulgation non-écrite P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons &amp; : membre de la même famille, document correspondant</p>		

1

EPO FORM 1503 03.82 (P04C13)